

## 明細書

## 集光素子および固体撮像装置

## 技術分野

[0001] 本発明は、デジタルカメラ等に使用される集光素子および固体撮像装置に関するものである。

## 背景技術

[0002] デジタルカメラやカメラ付携帯電話等の普及に伴い、固体撮像装置の市場は著しく拡大している。このような流れの中、固体撮像装置の高解像度化や高感度化はさらに加速していくと考えられる。

[0003] 現在、固体撮像装置として広く使用されているCCDやMOSイメージセンサでは、複数の受光部分を有する半導体集積回路を2次元状に配列して、被写体からの光信号を電気信号に変換している。

[0004] 固体撮像素子の感度は、入射光量に対する受光素子の出力電流の大きさによって定義されていることから、入射した光を確実に受光素子に導入することが感度向上のため重要な要素となっている。

[0005] 従来の一般的な画素の構造の一例を図1に示す。固体撮像装置(青色光用単位画素)70は、入射光を集光するマイクロレンズ33、青色(B)を色分離して透過させるカラーフィルタ2、入射光を電荷に変換する受光素子(Siフォトダイオード)6、電荷を転送するための電気信号伝送部4、Al配線3、平坦化層5、およびSi基板7を備える。赤色(R)および緑色(G)用の固体撮像装置についても、カラーフィルタ2のみが異なることを除いて同じ構成である。このような構成は、比較的高い集光効率が得られることから、マイクロレンズ33はほとんど全ての固体撮像装置において使用されている。

[0006] 一方、フレネルレンズを利用した固体撮像装置として、様々な技術が開示されている(例えば、特許文献1、特許文献2参照)。

[0007] 上記特許文献1に開示された技術では、レンズは同心円状に異なる屈折率をもつ複数の層からなり、中心部が最も屈折率が高く、周辺部になるにつれて順に屈折率が減少するように構成されている。また、上記特許文献2に開示された技術では、厚

さ分布型レンズと、ドーピングによって連続的に屈折率分布を持たせた分布屈折率型レンズが利用されている。

特許文献1:特開2000-39503号公報

特許文献2:特開平5-251673号公報

## 発明の開示

### 発明が解決しようとする課題

[0008] 今後、固体撮像装置の高解像度化や高感度化を進めていくためには、集光効率を損なうことなく、画素を小型化する必要がある。しかしながら、マイクロレンズはマイクロメートルオーダーの非常に微細な構造であり、リフローで自己組織的に形成されるため、小型化を行おうとする場合、球面形状の形成の制御が非常に困難である。

[0009] また、マイクロレンズでは、集光効率が信号光の入射角度に依存して低下するという問題がある。つまり、図1に示すように、マイクロレンズ33に垂直に入射する光35については高効率に集光することができるが、斜めに入射する光34に対しては十分な集光ができないため集光効率が減少する。

[0010] 図2は、従来の画素配列の基本構造を示す図である。入射光26は、光学レンズ27により焦点距離上に設置された固体撮像装置28に入射する。固体撮像装置28は複数の画素の2次元配列で構成されているため、広がり角を持つ入射光の場合、中央画素と周辺画素とでは入射角が異なる。その結果、周辺の画素の集光効率が中央より低下するという問題が起こる。

[0011] 図3に従来の周辺部の画素の構造の一例を示す。固体撮像装置80の周辺部の画素では入射光34の入射角度が大きくなるため、受光素子6、電気信号伝送部4およびAI配線3といった電気配線部分を内側(中央)方向にずらす、すなわちシーリングさせることによって、集光効率の向上を図っている。しかしながら、周辺画素の光量は中央部分の約40%程度であり、素子全体の感度は周辺素子の感度に律速されているのが現状である。また、この値は画素サイズの減少に伴ってさらに低下するため、小型カメラのような短焦点光学系への応用が非常に困難になる。さらに固体撮像装置の製造工程においては、マイクロレンズ33、受光素子6、電気信号伝送部4およびAI配線3の位置合わせが必要となる。

[0012] そこで、本発明は、固体撮像装置の高解像度化や高画質化を実現するために、マイクロレンズよりも高角度光入射に強い集光素子、および、その集光素子の製造方法を提供することを目的とする。

### 課題を解決するための手段

[0013] 上記目的を達成するために、本発明に係る集光素子は、入射光を集光する集光素子であって、前記入射光が入射する基板と、前記基板上の前記入射光が入射する位置に形成された、光透過膜の集合体とを備え、前記光透過膜は、前記入射光の波長と同程度か、それより短い幅のゾーン形状を有し、前記光透過膜の集合体が実効屈折率分布を生じることを特徴とする。

[0014] これにより、マイクロレンズより高角度光入射に強い集光素子を実現することができる。

[0015] また、前記光透過膜の集合体において、各光透過膜の線幅が一定であるように構成してもよい。

[0016] これにより、集光素子の製造プロセスが容易になることから、精度の高い集光素子を低コストで生産することが可能となる。

[0017] また、前記光透過膜が対象とする入射光の波長と同程度、もしくはそれ以下で分割した領域において、前記光透過膜の前記線幅の合計が、より内側のゾーン中心側領域の光透過膜の線幅の合計より小さいことを特徴とする。

[0018] これにより、光透過膜の有効屈折率は集光素子の中央から周辺に向かって減少するようになるので、集光特性を有する分布屈折率レンズを実現することができる。

[0019] さらに、前記ゾーン形状は同心円でもよい。

また、入射光の波長を $\lambda$ 、焦点距離を $f$ 、光入射側媒質の屈折率を $n_0$ 、光出射側媒質の屈折率を $n_1$ 、 $m$ を非負の整数、前記光透過膜の屈折率の最大値を $n_0 + \Delta n_{\max}$ とした場合において、前記 $n_0$ に対する差分を $\Delta n(r)$ とするとき、

$$\Delta n(r) = \Delta n_{\max} [1 + m - n_1 r^2 / (2 \lambda f)]$$

をほぼ満たすことを特徴とする。

[0020] さらに、入射光の波長を $\lambda$ 、焦点距離を $f$ 、前記分割した領域の幅を $a$ 、光出射側媒質の屈折率を $n_1$ 、 $m$ を非負の整数、および、フレネルゾーン境界を $r_m$ （すなわち、 $r_m^2$

$= 2m \lambda f / n_1$  を満たす非負の数)とするとき、 $r_m$  より大きく  $r_{m+1}$  より小さい  $r$  を内周の半径  $r$  とする前記分割領域内の前記光透過膜の前記線幅の合計  $W$  は、

$$W = a(1 + m - n_1 r^2 / (2 \lambda f))$$

を満たすことを特徴とする。

- [0021] これにより、ある波長をもつ入射光の焦点距離を光透過膜の形状のみで指定でき、半導体リソグラフィプロセスで分布屈折率レンズを形成することができる。
- [0022] また、前記光透過膜の法線方向の高さが一定であることを特徴とする。  
これにより、集光素子の膜厚が均一であることから、従来の半導体プレーナープロセスによって集光素子の形成が可能であり、製造コストを低減させることができる。
- [0023] また、前記光透過膜の法線方向の断面形状が矩形であることを特徴とする。  
これにより、正確な屈折率分布を実現することができるため、集光効率が高まる。
- [0024] また、前記光透過膜は、 $TiO_2$ 、 $ZrO_2$ 、 $Nb_2O_5$ 、 $Ta_2O_5$ 、 $Si_3N_4$  および  $Si_2N_3$  の中のいずれかを含むことを特徴とする。
- [0025] これらは高屈折率光透過材料であるので、光透過膜の膜厚を薄くすることができ、製造プロセスが容易になる。
- [0026] さらに、前記光透過膜は、BまたはPが添加された  $SiO_2$  (BPSG) および TEOS の中のいずれかを含むことを特徴とする。
- [0027] これらは従来の半導体プロセスで一般的に使用されている材料であるので、集光素子の容易な形成が可能であり、製造コストを低減させることができる。
- [0028] また、前記光透過膜は、ベンゾシクロブテン、ポリメタクリル酸メチル、ポリアミドおよびポリイミドの中のいずれかを含むことを特徴とする。
- [0029] これらを含む樹脂は直接加工が可能であり、製造コストを低減させることができる。  
また、上記目的を達成するため、本発明に係る固体撮像装置は、集光素子を備える単位画素が2次元状に設置された固体撮像装置であって、前記集光素子は、前記入射光が入射する基板と、前記基板上の前記入射光が入射する位置に形成された、光透過膜の集合体とを備え、前記光透過膜は、前記入射光の波長と同程度か、それより短い幅のゾーン形状を有し、前記光透過膜の集合体が実効屈折率分布を生じることを特徴とする。

[0030] これにより、マイクロレンズを用いることなく、単位画素の集光効率を向上させることができる。従って、高解像度、高感度な固体撮像装置を実現することができる。さらに、中央付近に配置された前記単位画の集光素子と、周辺付近に配置された単位画の集光素子とでは、前記光透過膜の線幅が異なることを特徴とする。

[0031] これにより、2次元配列したすべての集光素子において、均一な集光効率を得ることができる。

[0032] さらに、少なくとも、前記入射光のうち第1の色光用の第1の単位画素と、前記第1の色光の代表波長とは異なる代表波長を有する第2の色光用の第2の単位画素とを備え、前記第1の単位画素は、第1の集光素子を備え、前記第2の単位画素は、前記第2の色光の焦点距離が前記第1の集光素子の前記第1の色光の焦点距離と等しい第2の集光素子を備えることを特徴とする。

[0033] これにより、入射光の波長によって各画素のレンズ構造を最適化することが可能となり、色による集光効率の違いを無くすことができる。

[0034] さらに、前記複数の単位画素が形成された面の中央に位置する前記単位画素の集光素子と、周辺に位置する単位画素の集光素子では、各前記分割領域内の前記光透過膜の前記線幅の合計が異なっていることを特徴とする。

[0035] これにより、固体撮像装置上の単位画素の位置によって、レンズ構造を最適化することが可能となり、固体撮像装置のシャーリング構造を緩和させることができる。また、集光素子の製造方法が容易となり、集光素子全体の感度を向上させることもできる。

[0036] さらに、前記複数の単位画素が形成された面の中央から周辺にかけて複数の同心状の領域で分割され、同一の領域内に属する前記単位画素の前記集光素子の焦点距離は等しく、前記同一の領域外に属する前記単位画素の前記集光素子の焦点距離とは異なることを特徴とする。

[0037] これにより、製造プロセスの容易性を失うことなく、入射角を面内で変えることができる。

[0038] さらに、前記単位画素は、前記集光素子の出射面側に、受光素子の上部を開口部とする配線層を備え、前記集光素子で集光された光の焦点が、前記配信層の前記開口部の位置と一致していることを特徴とする。

[0039] これにより受光面を最大限に使用でき、集光効率が高くなる。

さらに、前記複数の単位画素が形成された面の中央に位置する前記単位画素では、前記受光素子の中心軸と前記集光素子の中心軸が一致するように形成され、周辺に位置する前記単位画素では、前記受光素子の中心軸より前記集光素子の中心軸が前記面の中央寄りに形成されていることを特徴とする。

[0040] これにより、低度のシュリンク構造をとることができ、周辺画素の集光効率がより向上する。

### 発明の効果

[0041] 本発明に係る集光素子および固体撮像装置は、同心構造の線幅の合計を変化させることによって、有効屈折率を変化させることができる分布屈折率型集光素子が実現できる。また、ある波長をもつ入射光の焦点距離を形状のみで指定でき、半導体リソグラフィプロセスで分布屈折率レンズを形成できる。また、従来型のレンズよりもより鋭い屈折率変化が生じ、集光効率が高まる。

[0042] また、高屈折率材料を用いるため、光透過膜の膜厚を薄くでき、製造プロセスが容易になる。

[0043] また、マイクロレンズを用いることなく、画素の集光効率を向上させることができる。従って、高解像度、高感度な固体撮像装置を実現できる。また、入射光の波長によって各画素のレンズ構造を最適化することが可能となり、色による集光効率の違いを無くすことができる。また、入射光の焦点距離が可変となり、各画素構造に適したレンズ設計が可能となる。また、入射光の入射角度によって各画素のレンズ構造を最適化することが可能となり、入射角度の増加に伴う集光効率の低下を無くすことができる。また、受光面を最大限に使用でき、集光効率が高くなる。

[0044] また、感度の高い1次元または2次元画像入力装置が実現できる。固体撮像装置上の画素の位置によって、レンズ構造を最適化することが可能となり、固体撮像装置のシュリンク構造を緩和させることができる。また、集光素子の製造方法が容易となり、集光素子全体の感度も向上する。また、プロセスの容易性を失うことなく、入射角を面内で変えることができる。また、低度のシュリンク構造をとることができ、周辺画素の集光効率がより向上する。

## 図面の簡単な説明

[0045] [図1]従来の固体撮像装置の基本構造を示す断面図である。

[図2]従来の画素配列の基本構造を示す図である。

[図3]従来の画素の基本構造を示す図である。

[図4]本発明の実施の形態1に係る単位画素の基本構造を示す図である。

[図5]本発明の実施の形態1に係る分布屈折率レンズの上面構造を示す図である。

[図6](a)～(e)は、本発明の実施の形態1に係る分布屈折率レンズの断面構造を示す図である。

[図7]本発明の実施の形態1に係る分布屈折率レンズの屈折率分布を示す図である

。

[図8](a)～(c)は、本発明の実施の形態2に係る単位画素の基本構造を示す図である。

[図9](a)～(c)は、本発明の実施の形態2に係る分布屈折率レンズの屈折率分布を示す図である。

[図10]本発明の実施の形態3に係る単位画素の基本構造を示す図である。

[図11](a)～(c)は、本発明の実施の形態3に係る分布屈折率レンズの屈折率分布を示す図である。

[図12](a)～(c)は、本発明の実施の形態3に係る分布屈折率レンズの集光特性(シミュレーション結果)を示す図である。

[図13]本発明の実施の形態4に係る単位画素の基本構造を示す図である。

[図14]本発明の実施の形態4に係る分布屈折率レンズの集光特性を示す図である。

[図15](a)～(c)は、本発明の実施の形態5に係る固体撮像装置の基本構造を示す図である。

[図16]本発明の実施の形態5に係る分布屈折率レンズの集光特性を示す図である。

[図17](a)～(d)は、本発明の実施の形態1～5に係る固体撮像装置の製造工程を示す図である。

## 符号の説明

[0046] 1、1a、1b 分布屈折率レンズ

2 カラーフィルタ  
3 Al配線  
4 電気信号伝送部  
5 平坦化層  
6 受光素子(Siフォトダイオード)  
7 Si基板  
8 半導体集積回路  
9、26 入射光  
13 B光用カラーフィルタ  
14 G光用カラーフィルタ  
15 R光用カラーフィルタ  
16 B光用レンズの屈折率分布  
17 G光用レンズの屈折率分布  
18 R光用レンズの屈折率分布  
19 焦点距離  
20 短焦点用レンズの屈折率分布  
21 中焦点用レンズの屈折率分布  
22 長焦点用レンズの屈折率分布  
27 光学レンズ  
28 固体撮像装置  
29 中心部の画素用の分布屈折率レンズ  
30 周辺部の画素用の分布屈折率レンズ  
31 入射光(中心部)  
32 入射光(周辺部)  
33 マイクロレンズ  
34 入射光(斜め入射)  
35 入射光(垂直入射)  
70～73、80 固体撮像装置

101	高屈折率材料( $TiO_2$ )
102	低屈折率材料(空気)
103	隣り合う分割領域の幅
104	ゾーンの線幅(合計)
104a、104b	ゾーンの線幅
105	B光用分布屈折率レンズ
106	G光用分布屈折率レンズ
107	R光用分布屈折率レンズ
150	ゾーンの線幅(合計)
150a～150c	ゾーンの線幅
200	レジスト
201	$TiO_2$
202	金型
203	Arイオンミリング
204	ウェットエッチング

### 発明を実施するための最良の形態

[0047] 以下、図面を用いて本発明の実施の形態をさらに具体的に説明する。

#### (実施の形態1)

図4は、本発明の実施の形態1に係る単位画素の基本構造を示す断面図である。固体撮像装置(青色光用単位画素)71は、サイズが $2.25\mu m$ 角であり、入射光9を集光する分布屈折率レンズ(「光透過膜の集合体」ともいう。)1、青色光(B)を色分離して透過させるカラーフィルタ2、入射光を電荷に変換する受光素子(Siフォトダイオード)6、電荷を転送するための電気信号伝送部4、Al配線3、平坦化層5、およびSi基板7を備える。なお、上記分布屈折率レンズ1は、所定の膜厚t(例えば、 $1\mu m$ )を有している。

[0048] 図5は、本発明の実施の形態1に係る分布屈折率レンズの上面構造を示す図である。同心ゾーン形状を有する光透過膜の集合体1は、高屈折率光透過材料101[例えば、 $TiO_2$ ( $n=2.53$ )]と低屈折率光透過材料102[例えば、空気( $n=1.0$ )]で構

成されており、複数の隣り合う分割領域の幅103は、例えば一定の200nmである。図5における同心状の高屈折率光透過材料101や同心状の低屈折率光透過材料102は、それぞれ1つのゾーンを形成する。したがって、分布屈折率レンズ1は、複数のゾーンの集合体である。なお、ゾーンの幅を「線幅」ということとする。

- [0049] ここで、「分割領域」とは、入射光の波長と同程度、もしくはそれ以下の任意の幅で同心状に分割した領域をいう。
- [0050] 図5では、分布屈折率レンズ1の各分割領域(即ち、破線で区切った領域)における高屈折率光透過材料は1つであり、各高屈折率光透過材料のゾーンの外周は各分割領域の外縁と一致している。
- [0051] なお、図5において、低屈折率光透過材料102は空気であるため、上記高屈折率光透過材料間の隙間を構成することとなる。また、低屈折率光透過材料としては、上記空気の代わりに、空気と屈折率が等しい真空でもよい。
- [0052] 図6(a)～(d)は、本発明の実施の形態1に係る分布屈折率レンズの断面構造を示す図である。図6(a)では、分布屈折率レンズ1の各分割領域における高屈折率光透過材料は1つであり、この分割領域の外縁に接するように高屈折率光透過材料が配置されている様子が示されている。図6(b)では、分布屈折率レンズ1の各分割領域における高屈折率光透過材料は1つであり、この分割領域の内縁に接するように高屈折率光透過材料が配置(即ち、この分割領域の外縁に接するように低屈折率光透過材料が配置)されている様子が示されている。
- [0053] なお、各分割領域において、光透過膜(即ち、ゾーン)の数は複数でもかまわない(図6(c)、(d))。このとき、高屈折率光透過材料の線幅が一定(図6(c))でもよいし、低屈折率光透過材料の線幅が一定(図6(d))でも勿論よい。また、各分割領域において、光透過膜の断面が貫通していないなくてもよい(図6(e))。つまり、図6(e)に示すように、1つの分割領域において、高屈折率光透過材料が「L字型」に形成され(即ち、低屈折率光透過材料が貫通していない)、残りの部分に低屈折率光透過材料が形成されていてもよい。この場合、上記図6(a)と図6(e)に示されるように、1つの分割領域における高屈折率光透過材料の体積比が同じであれば、これらは同等の屈折率を有するといえる。

[0054] 図6(a)～(d)においては、いずれの分布屈折率レンズにおいても、各分割領域におけるゾーンの線幅の合計104は、その中央部分が最も大きく、外側の分割領域になるに従って、線幅の合計104は順に小さくなっていく。即ち、ある外側の分割領域におけるゾーンの線幅の合計は、より内側の分割領域(ゾーン中心側領域)におけるゾーンの線幅の合計より小さい。

[0055] また、分布屈折率レンズ1では、対応する分割領域の線幅の合計104は同じになっている。すなわち、図6(c)における線幅104aと線幅104bの合計は、図6(a)又は(b)における線幅104の長さと等しい。同様に、図6(d)における線幅150a、線幅150bおよび線幅150cの合計は、図6(b)における線幅150の長さと等しい。なお、図6(a)～(d)に示す何れの分布屈折率レンズにおいても、膜厚tは $1\mu\text{m}$ で一定である。

[0056] 上記分割領域の幅が、入射光の波長と同程度かそれより小さいときには、光が感じる有効屈折率 $n_{\text{eff}}$ は、

$$n_{\text{eff}} = \{W \times nh + (a - W)nl\} / a \quad (1)$$

で表すことができる。ここで、Wは分割領域内の高屈折率光透過材料の線幅(線幅の合計も含む。)、aは各分割領域の幅、nhおよびnlはそれぞれ高屈折率光透過材料および低屈折率光透過膜材料の屈折率をそれぞれ表している。

[0057] 図7は、本発明の実施の形態1に係る分布屈折率レンズの屈折率分布を示す図である。分布屈折率レンズの屈折率は、中央部分が最も高く、端になるに従って順に低くなるような階段状の特性になる。なお、図7に示す放物線は、波長 $\lambda$ (550nm)の入射光を焦点距離f(4.43 $\mu\text{m}$ )で集光させるための屈折率分布を示しており、次の式で表される(例えば、『光集積回路』、オーム社、西原浩共著、1993年8月発行、p.299参照)。

[0058] 
$$\Delta n(r) = \Delta n_{\text{max}} [1 + m - n_1 r^2 / (2 \lambda f)] \quad (2)$$

ここで、入射光の波長を $\lambda$ 、焦点距離をf、光入射側材料(光入射側媒質)の屈折率を $n_0$ 、光出射側材料(光出射側媒質)の屈折率を $n_1$ 、非負の整数をm、光透過膜の屈折率の最大値を $n_0 + \Delta n_{\text{max}}$ (この場合、 $\Delta n_{\text{max}}$ は1.53)とし、位置rにおける前記 $n_0$ に対する屈折率の差分を $\Delta n(r)$ とする。

[0059] 上記の(1)および(2)式から、円形のゾーン形状を有する光透過膜の外周の半径

が $r$ である、当該光透過膜の線幅 $W$ は、

$$W = a(1 + m - n_1 r^2 / (2 \lambda f)) \quad (3)$$

を満たす。

[0060] ただし、 $m = 0, 1, 2, \dots$

および、 $r_m < |r| < r_{m+1}$  であり、

フレネルゾーン境界 $r_m > 0$ は、

$$r_m^2 = 2m \lambda f / n_1$$

を満たす。なお、本発明に係る分布屈折率レンズの屈折率分布は、各分割領域における放物線の中心値をとるように設計している。

[0061] 上記の(3)式からも明らかのように、本発明に係る集光素子の最大の特長は、線幅 $W$ を変えるだけで入射光の位相を変調することができ、焦点を自由自在に決定できることであり、特定の波長をもつ光に対応した分布屈折率レンズを実現できることである。

[0062] 例えば、図4に示した実施の形態において、分布屈折率レンズの集光率は約97%であり、マイクロレンズの場合の集光率90%よりも高い集光効率を実現している。

[0063] 以上のように、光透過膜の集合体を構成する光透過材料の線幅の合計を変化させることによって、有効屈折率を変化させることができる分布屈折率型集光素子が実現できる。

[0064] (実施の形態2)

図8(a)～(c)は、本発明の実施の形態2に係る単位画素の基本構造を示す図である。固体撮像装置の各画素に垂直に入ってきたB光10、G光11およびR光12は、それぞれB用分布屈折率レンズ105、G用分布屈折率レンズ106およびR用分布屈折率レンズ107によって集光され、B用カラーフィルタ13、G用カラーフィルタ14およびR用カラーフィルタ15を通過して、各受光部で電気信号への変換が行われる。本発明に係る分布屈折率レンズ105～107では、入射光10～12の波長によって各単位画素のレンズ構造を最適化することができる。すなわち、B用分布屈折率レンズ105では、同心円状の各分割領域における高屈折率光透過材料の線幅(の合計)の減少率

が大きい(即ち、外側になるほど光透過膜の線幅が急激に細くなる)のに対して、G用分布屈折率レンズ106、R用分布屈折率レンズ107となるにつれて、緩やかな線幅の減少(即ち、外側の光透過膜でも線幅が急激に細くならない)となっている。これは、上記(2)式にも示したように、屈折率分布が入射光の波長 $\lambda$ に反比例するためである。

[0065] 図9(a)～(c)は、本発明の実施の形態2に係る分布屈折率レンズの屈折率分布を示す図である。つまり、図9(b)に示した緑用の屈折率変化17を中心にして、図9(a)に示すように波長が短い(青色側)ほど屈折率変化16は大きく、図9(c)に示すように波長が長い(赤色側)ほどプロードな分布18を有している。

[0066] 以上のように、ある波長をもつ入射光の焦点距離を、光透過膜の集合体を形成する光透過材料の線幅のみで制御でき、半導体リソグラフィプロセスを用いて、本発明に係る分布屈折率レンズを形成することが可能となる。

[0067] (実施の形態3)

図10は、本発明の実施の形態3に係る単位画素の基本構造を示す図である。固体撮像装置72に垂直に入ってきた入射光9は、分布屈折率レンズ1によって集光され、カラーフィルタ2を通過して、受光部(図では省略している。)に到達する。このとき、入射光9の焦点距離19は、これまでに説明したとおり、各単位画素の集光素子であるレンズの構造によって可変させることができる。

[0068] 図11(a)～(c)は、本発明の実施の形態3に係る分布屈折率レンズの屈折率分布を示す図である。図11(b)に示す中焦点用レンズの屈折率変化21を基準としてこれらを比較してみると、図11(a)に示す短焦点用レンズでは屈折率変化20が大きく、図11(c)に示す長焦点レンズでは緩やかな分布22となっている。本実施の形態における単位画素では、以上の特性を反映させて各分布屈折率レンズの構造を設計している。

[0069] 図12(a)～(c)は、本発明の実施の形態3に係る分布屈折率レンズの集光特性を示す図である。図12(a)～(c)には、焦点距離を2.66～4.47 μmの間で変化させたときの、各単位画素中における光伝播プロファイルのシミュレーション結果が示されている。図12(a)、(b)および(c)の順で設定した焦点距離が長くなるに従って、光束

の収束位置(各図の右側に矢印で示している)が受光素子側(即ち、図の上方側)に移行していく様子が確認できる。これは、上記(2)式に従って集光素子のレンズ構造を変化させることによって、焦点距離の制御が可能であることを示唆している。

[0070] 固体撮像装置の高解像度化を達成するためには、画素の高密度化が必要となる。しかしながら、画素サイズの減少に伴って、受光素子であるフォトダイオードの面積は小さくなるが、AI配線の面積はほとんど変わらない。そのため、入射側の配線部分による遮光面積が広くなり(つまり入口が狭くなり)、集光効率は低下する。例えば、画素サイズが $2.25 \mu m$ で開口率が24%程度であるとき、焦点距離を配線部3の開口部に設定することにより、受光部6に到達する光量は増加し、集光効率は著しく改善する。例えば、上記の例では集光効率を90%にも達する。

[0071] 以上のように、本発明に係る集光素子は、その構造により入射光の焦点距離が可変となり、各単位画素の構造に適したレンズ設計が可能となる。

[0072] (実施の形態4)

図13は、本発明の実施の形態4に係る単位画素の基本構造を示す図である。固体撮像装置73に特定の角度 $\theta$ で入ってきた入射光9は、分布屈折率レンズ1によって集光され、カラーフィルタ2を通過して、受光部6に到達する。分布屈折率レンズ1のパラメータである焦点距離、波長および膜厚を変化させることによって、高角度入射に強いレンズが形成することが可能である。例えば、本実施の形態では、入射角30°のG光( $\lambda = 550nm$ )に対して、焦点距離 $2.9 \mu m$ 、レンズ長 $0.9 \mu m$ の分布屈折率レンズを形成している。このときの集光効率は50%であり、マイクロレンズの約5倍の集光効率となっている。

[0073] 図14は、本発明の実施の形態4に係る分布屈折率レンズの集光特性を示す図である。図14からも明らかのように、本発明に係る分布屈折率レンズは、従来のマイクロレンズと比較して、入射光の角度依存性に強いことがわかる。例えば、入射角度が5°以上になるとマイクロレンズでは集光効率が低下し始めるのに対し、分布屈折率レンズでは10°程度まで集光効率を90%に保っている。また、入射角度が20°ではマイクロレンズでは約30%であるのに対し、分布屈折率レンズでは70%以上である。さらに、入射角度が30°ではマイクロレンズでは約10%であるのに対し、分布屈折

率レンズでは50%を保っている。

[0074] 以上のように、本発明に係る固体撮像装置は、入射角度の増加に伴う集光効率の低下を抑制することができることから、携帯電話用カメラ等の短焦点光学系への応用が期待できる。

[0075] 以上のように、本発明に係る集光素子では、入射光の入射角度によって各単位画素のレンズ構造を最適化させることができるとおり、入射角度の増加に伴う集光効率の低下を抑制することができる。

[0076] (実施の形態5)

図15(a)～(c)は、本発明の実施の形態5に係る固体撮像装置の基本構造を示す図である。本固体撮像装置は、31万画素のVGAを使用している。図15(a)に示すように、信号光26は光学レンズ27によって集光され、分布屈折率レンズを有する固体撮像装置28上に照射される。受光素子および配線等からなる半導体集積回路8ならびに分布屈折率レンズが2次元状に配列されている固体撮像装置28においては、中心部分の単位画素と周辺部分の単位画素とでは、光の入射角度が異なる。図15(b)に示すように、固体撮像装置28の中心部分の単位画素には入射光31がほぼ0°で入射するのに対して、図15(c)に示すように、周辺部分の単位画素には入射光32が約30°で入射する。

[0077] そこで、本実施の形態では、固体撮像装置28の中心部分から周辺部分にかけて段階的に4種類の分布屈折率レンズを、同心形状に形成する。それぞれの分布屈折率レンズは、固体撮像装置28上の単位画素の位置によってレンズ構造を最適化し、最も集光効率が高くなるようにする。すなわち、図15(b)に示すように、中心部分に位置する単位画素の分布屈折率レンズ29は、通常の構造の分布屈折率レンズであるが、図15(c)に示すように、周辺部分に位置する画素の分布屈折率レンズ30は、斜め入射光に対応するため、通常より線幅を小さくすることにより、屈折率変化が大きくなるようにしてある。これにより、角度成分が大きい入射光であっても、そのほとんどが開口部分に到達することができるため、周辺部に位置する画素であっても高い集光効率を達成することができる。

[0078] なお、本実施の形態では、半導体集積回路のシュリンクは行っていない。また、4段

階でなくとも2、3あるいは5段階以上の領域を定義して分布屈折率レンズを最適な形状に形成するようにしても勿論よい。

[0079] 図16は、本発明の実施の形態5に係る分布屈折率レンズの集光特性を示す図である。入射角度が増加することは、単位画素の位置が固体撮像装置のより周辺に位置することを示唆している。図16には本発明の効果の比較として、従来のマイクロレンズ構造における集光効率を示し、半導体集積回路のシュリンクを行っている固体撮像装置のデータを併記して示している。図16からも明らかなように、本発明に係る分布屈折率レンズを有する固体撮像装置では、シュリンクを行っていないにもかかわらず、シュリンクを行っている固体撮像装置と同程度の、例えば入射角度が30°でも50%程度という集光効率を達成している。さらに、入射角度が20°以内では、シュリンクを行っている固体撮像装置以上の集光効率を得ることに成功している。例えば、入射角度が20°の場合、シュリンクを行っている固体撮像装置では80%程度であるのに対して、本発明に係る分布屈折率レンズを有する固体撮像装置では90%程度という集光効率を達成している。このことはシュリンクフリーの固体撮像装置の製造が可能であることを示唆している。

[0080] また、さらに本発明に係る固体撮像装置に対して、低度のシュリンクを施す対応をするだけで、集光効率が画素位置に依存しない高感度の固体撮像装置が実現できることが期待できるので、本発明に係る分布屈折率レンズを有する固体撮像装置の有用性は極めて高い。

[0081] (実施の形態6)

図17(a)～(d)は、本発明の実施の形態1～5に係る固体撮像装置の製造工程を示す図である。以下に説明するように、本発明に係る分布屈折率レンズの形成はナノインプリントングとエッチングによって行う。

[0082] 図17(a)に示すように、まず通常の半導体プロセスを用いて、Si基板上に受光素子、および配線、遮光層、信号伝送部等(図17では省略している。)からなる半導体集積回路8、カラーフィルタ2および平坦化層5を順次形成する。なお、1画素のサイズは、2.25  $\mu$ m角であり、受光部は1.1  $\mu$ m角である。

[0083] その後にプラズマCVDを用いて、平坦化層5の上部にTiO<sub>2</sub>膜201を形成し、その

上部にレジスト200を塗布する。なお、 $TiO_2$ 膜201とレジスト200の厚みはそれぞれ0.8  $\mu m$ と1  $\mu m$ である。

[0084] 次に、図17(b)に示すように、同心円構造をパターニングしてあるSiC製のモールド(金型)202を、レジスト200に150°Cで加熱プレスすることによって、微細構造をレジスト200上に転写する。なお、モールドは通常の電子線ビームリソグラフィーとエッチングによって形成したものである。

[0085] その後、図17(c)に示すように、180°Cでポストベークを行った後、Arイオンミリングによって、第1段階のエッチング203を行う。次に、図17(d)に示すように、レジスト200を除去した後、ウェットエッチング204によって画素上に同心円構造を有する分布屈折率レンズを形成する。以上の工程により本発明に係る固体撮像装置が形成できる。

[0086] このように、本発明に係る集光素子の製造方法により、微細な同心構造を容易に大量形成することが可能となる。また各画素間の相対位置のズレがなくなり、調整作業の工程が減り、集光素子の低価格化が実現できる。また、本分布屈折率レンズは、レンズ膜厚を一定としているため、上記製造プロセスが容易に行うことができ、製造コストダウンが可能である。また、本分布屈折率レンズは、法線方向の断面形状が矩形である。

[0087] 以上で説明を行った実施の形態2～5におけるレンズは、最小加工寸法1nm以下の金型を用いたナノプリンティング法によって形成しており、 $TiO_2$ と空気の屈折率差を利用した分布屈折率レンズである。

[0088] また、光透過膜は、屈折率が1.45以上3.4以下の高屈折透明材料を用いるのが望ましい。さらに、光透過膜は、 $TiO_2$ (屈折率2.3～2.55)、 $ZrO_2$ (2.05)、 $Nb_2O_5$ (2.2)、 $Ta_2O_5$ (2.1)、 $Si_3N_4$ (2.0)および $Si_2N_3$ の中のいずれかを用いるのが望ましい。これらは高屈折率材料であるため、光透過膜の膜厚を薄くでき、製造プロセスが容易になる。

[0089] また、光透過膜は、BまたはPが添加された $SiO_2$ (BPSG(Boro-Phospho Silicated Glass))およびTEOS(TetraethoxySilane)の中のいずれかを用いるのが望ましい。これらは従来の半導体プロセスで一般的に使用されている材料であるので、集光素子

の容易な形成が可能であり、製造コストを低減させることができる。

[0090] また、光透過膜は、ベンゾシクロブテン(1. 5)、ポリメタクリル酸メチル(1. 55)、ポリアミド(1. 53)およびポリイミド(1. 58)の中のいずれかを用いるのが望ましい。樹脂は直接加工でき、ナノインプリントで直接集光素子を形成できるため、量産性が高まる。

[0091] なお、上記実施の形態1～5では、CCDを用いているが、MOSセンサを用いても勿論よい。また、説明を行った分布屈折率レンズと同じ特性をもつ、他の材料によって形成された分布屈折率レンズを用いても勿論よい。また、以上で説明した方法以外の製造方法を用いて分布屈折率レンズを製造しても勿論よい。また、低屈折率材料には空気を用いたが、他の材料を用いてもよい。

[0092] また、光透過膜の形状は円でなくとも多角形や橢円などのその他の同心形状であっても勿論よい。また、本発明のレンズを搭載したセンサをシュリンク構造としても勿論よい。

#### 産業上の利用の可能性

[0093] 本発明に係る集光素子および固体撮像装置は、デジタルビデオカメラ、デジタルスチルカメラ、カメラ付携帯電話等に利用が可能であり、性能向上や低価格化も実現できるため、産業上有用である。

## 請求の範囲

[1] 入射光を集光する集光素子であつて、  
 前記入射光が入射する基板と、前記基板上の前記入射光が入射する位置に形成された、光透過膜の集合体とを備え、前記光透過膜は、前記入射光の波長と同程度か、それより短い幅のゾーン形状を有し、前記光透過膜の集合体が実効屈折率分布を生じる  
 ことを特徴とする集光素子。

[2] 前記光透過膜の集合体において、各光透過膜の線幅が一定である  
 ことを特徴とする請求項1記載の集光素子。

[3] 前記光透過膜が対象とする入射光の波長と同程度、もしくはそれ以下で分割した領域において、前記光透過膜の前記線幅の合計が、より内側のゾーン中心側領域の光透過膜の線幅の合計より小さい  
 ことを特徴とする請求項1又は2記載の集光素子。

[4] 前記ゾーン形状は同心円である  
 ことを特徴とする請求項3記載の集光素子。

[5] 入射光の波長を $\lambda$ 、焦点距離を $f$ 、光入射側媒質の屈折率を $n_0$ 、光出射側媒質の屈折率を $n_1$ 、 $m$ を非負の整数、前記光透過膜の屈折率の最大値を $n_0 + \Delta n_{\max}$ とした場合において、前記 $n_0$ に対する差分を $\Delta n(r)$ とするとき、  

$$\Delta n(r) = \Delta n_{\max} [1 + m - n_1 r^2 / (2 \lambda f)]$$
 をほぼ満たす  
 ことを特徴とする請求項3記載の集光素子。

[6] 入射光の波長を $\lambda$ 、焦点距離を $f$ 、前記分割した領域の幅を $a$ 、光出射側媒質の屈折率を $n_1$ 、 $m$ を非負の整数、および、フレネルゾーン境界を $r_m$ （すなわち、 $r_m^2 = 2m\lambda f / n_1$ を満たす非負の数）とするとき、 $r_m$ より大きく $r_{m+1}$ より小さい $r$ を内周の半径 $r$ とする前記分割領域内の前記光透過膜の前記線幅の合計 $W$ は、  

$$W = a(1 + m - n_1 r^2 / (2 \lambda f))$$
 を満たす  
 ことを特徴とする請求項3記載の集光素子。

- [7] 前記光透過膜の法線方向の高さが一定であることを特徴とする請求項1記載の集光素子。
- [8] 前記光透過膜の法線方向の断面形状が矩形であることを特徴とする請求項1記載の集光素子。
- [9] 前記光透過膜は、 $TiO_2$ 、 $ZrO_2$ 、 $Nb_2O_5$ 、 $Ta_2O_5$ 、 $Si_3N_4$  および  $Si_2N_3$  の中のいずれかを含むことを特徴とする請求項1記載の集光素子。
- [10] 前記光透過膜は、BまたはPが添加された  $SiO_2$  (BPSG) およびTEOSの中のいずれかを含むことを特徴とする請求項1記載の集光素子。
- [11] 前記光透過膜は、ベンゾシクロブテン、ポリメタクリル酸メチル、ポリアミドおよびポリイミドの中のいずれかを含むことを特徴とする請求項1記載の集光素子。
- [12] 集光素子を備える単位画素が2次元状に設置された固体撮像装置であつて、前記集光素子は、前記入射光が入射する基板と、前記基板上の前記入射光が入射する位置に形成された、光透過膜の集合体とを備え、前記光透過膜は、前記入射光の波長と同程度か、それより短い幅のゾーン形状を有し、前記光透過膜の集合体が実効屈折率分布を生じることを特徴とする固体撮像装置。
- [13] 中央付近に配置された前記単位画の集光素子と、周辺付近に配置された単位画の集光素子とでは、前記光透過膜の線幅が異なることを特徴とする請求項12記載の固体撮像装置。
- [14] 少なくとも、前記入射光のうち第1の色光用の第1の単位画素と、前記第1の色光の代表波長とは異なる代表波長を有する第2の色光用の第2の単位画素とを備え、前記第1の単位画素は、第1の集光素子を備え、前記第2の単位画素は、前記第2の色光の焦点距離が前記第1の集光素子の前記

第1の色光の焦点距離と等しい第2の集光素子を備える

ことを特徴とする請求項12記載の固体撮像装置。

[15] 前記複数の単位画素が形成された面の中央に位置する前記単位画素の集光素子と、周辺に位置する単位画素の集光素子では、各前記分割領域内の前記光透過膜の前記線幅の合計が異なっている

ことを特徴とする請求項12記載の固体撮像装置。

[16] 前記複数の単位画素が形成された面の中央から周辺にかけて複数の同心状の領域で分割され、同一の領域内に属する前記単位画素の前記集光素子の焦点距離は等しく、前記同一の領域外に属する前記単位画素の前記集光素子の焦点距離とは異なる

ことを特徴とする請求項12記載の固体撮像装置。

[17] さらに、前記単位画素は、

前記集光素子の出射面側に、受光素子の上部を開口部とする配線層を備え、

前記集光素子で集光された光の焦点が、前記配信層の前記開口部の位置と一致している

ことを特徴とする請求項12記載の固体撮像装置。

[18] 前記複数の単位画素が形成された面の中央に位置する前記単位画素では、前記受光素子の中心軸と前記集光素子の中心軸が一致するように形成され、周辺に位置する前記単位画素では、前記受光素子の中心軸より前記集光素子の中心軸が前記面の中央寄りに形成されている

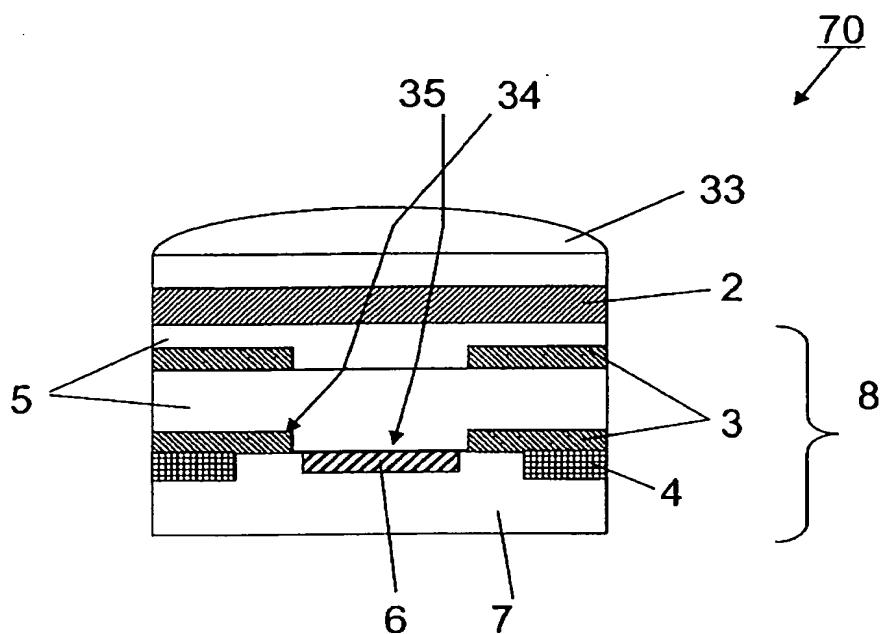
ことを特徴とする請求項17記載の固体撮像装置。

## 要 約 書

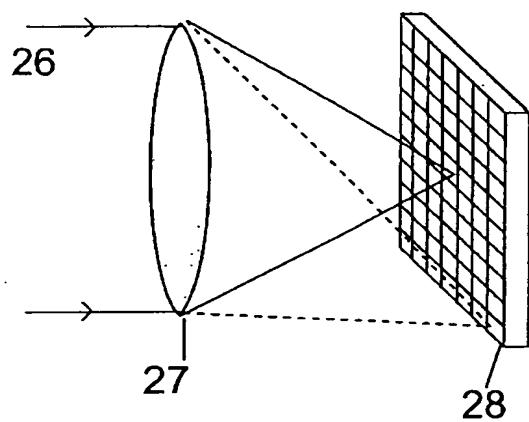
固体撮像装置の高解像度化や高画質化を実現するために、マイクロレンズよりも高角度光入射に強い集光素子、および、その集光素子の製造方法を提供する。

面内方向に分割領域の幅103が一定で分割された複数の分割領域ごとに、分割領域の幅103に対して線幅の合計の占める割合が互いに異なる、同心形状を有する光透過膜101を備える。各分割領域において、光透過膜101の外周／内周は分割領域の外周／内周と一致してもよい。各分割領域において、線幅の合計が、隣接する内側の分割領域の線幅の合計より小さい。同心ゾーン形状は円であり、入射光の波長を $\lambda$ 、焦点距離を $f$ 、分割領域の幅を $a$ 、光透過膜の実効屈折率を $n_1$ 、および、フレネルゾーン境界を $r_m$ とするとき、 $r_m$ より大きく $r_{m+1}$ より小さい $r$ を内周の半径とする分割領域内の光透過膜の線幅の合計 $W$ は、 $W=a(1+m-n_1 r^2/(2 \lambda f))$ を満たす。

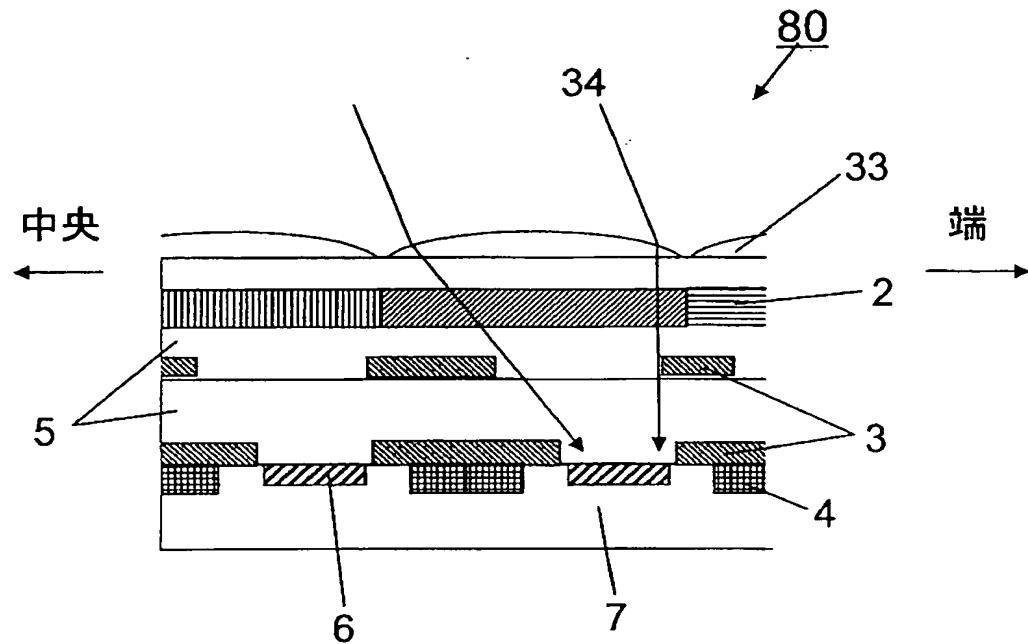
[図1]



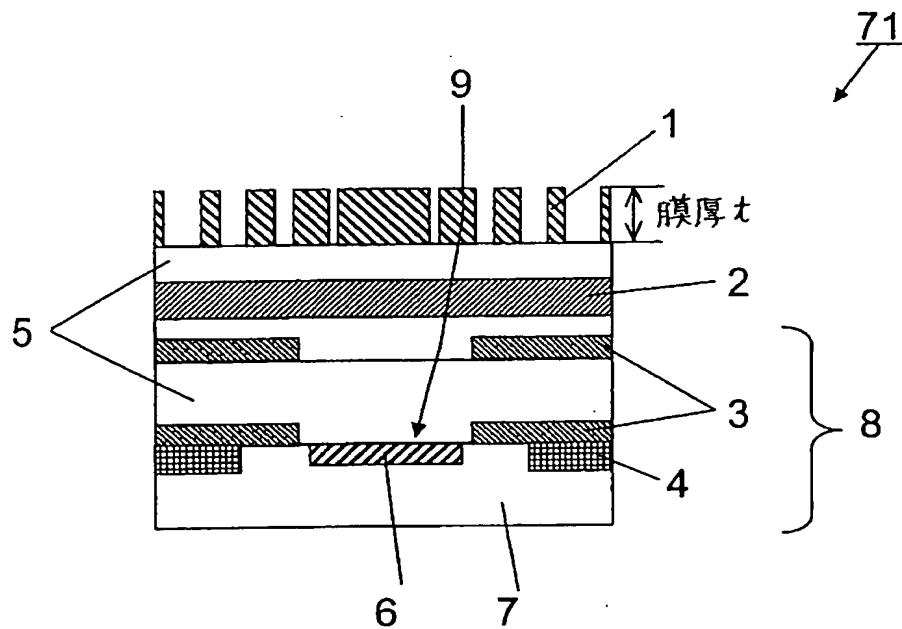
[図2]



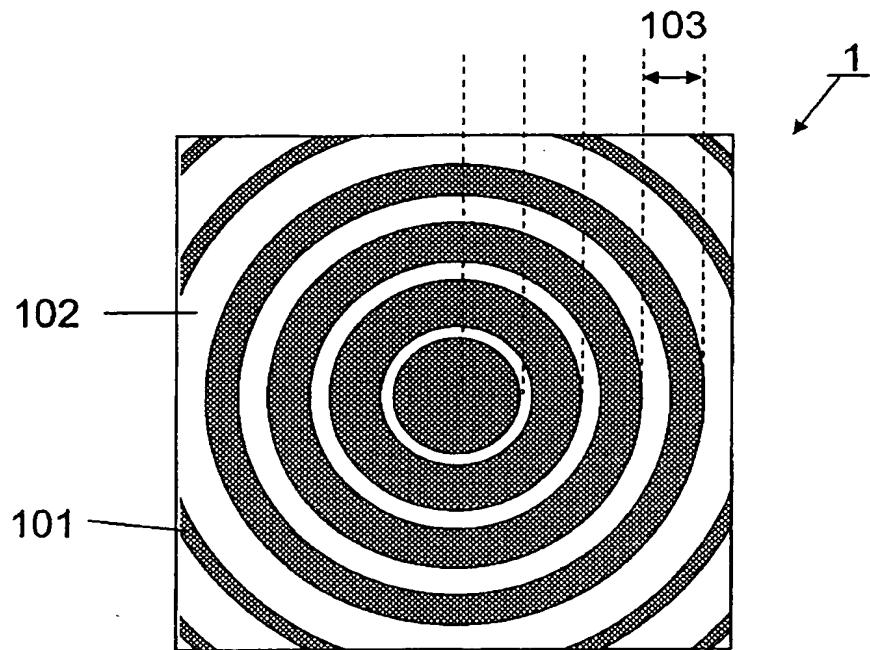
[図3]



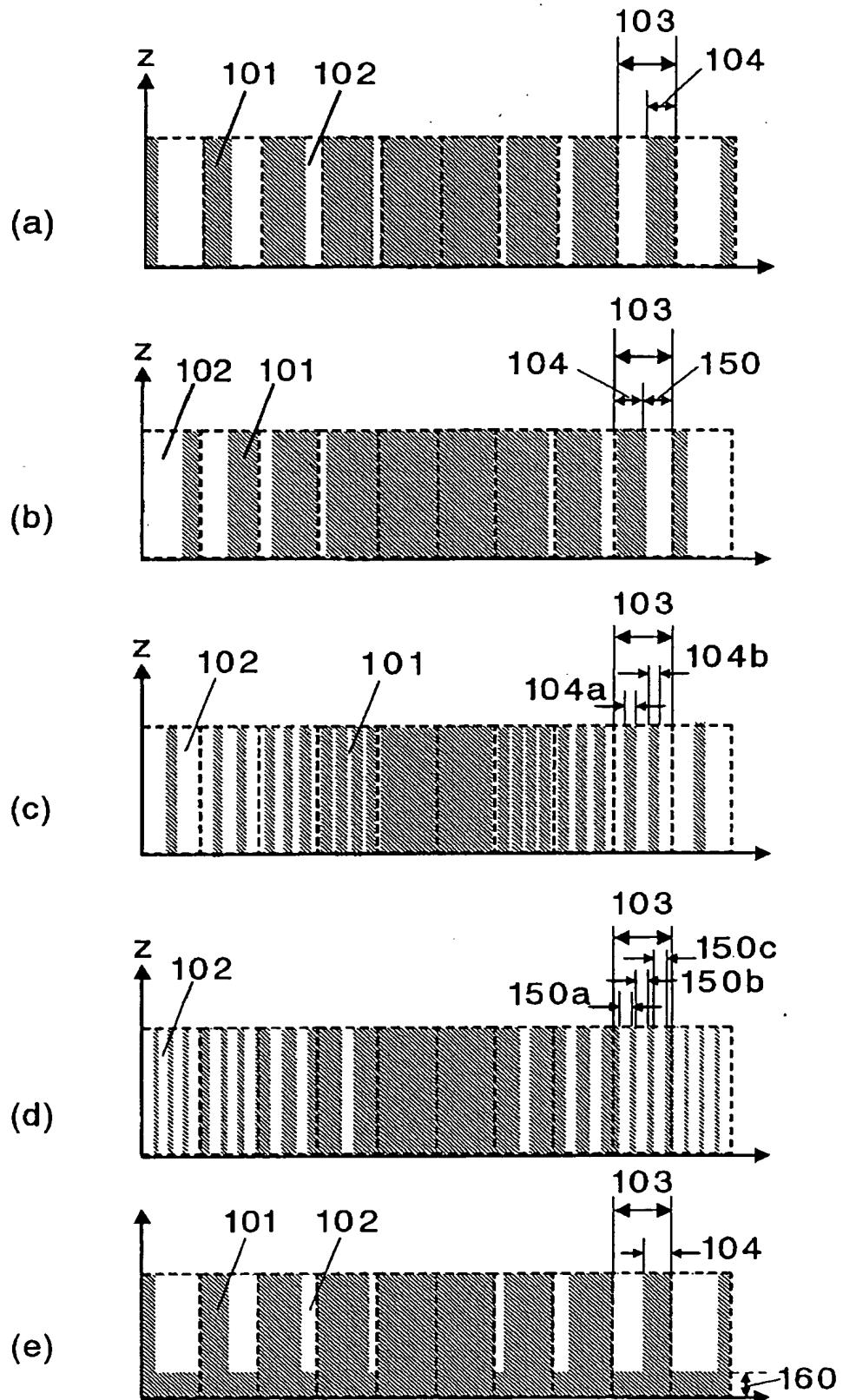
[図4]



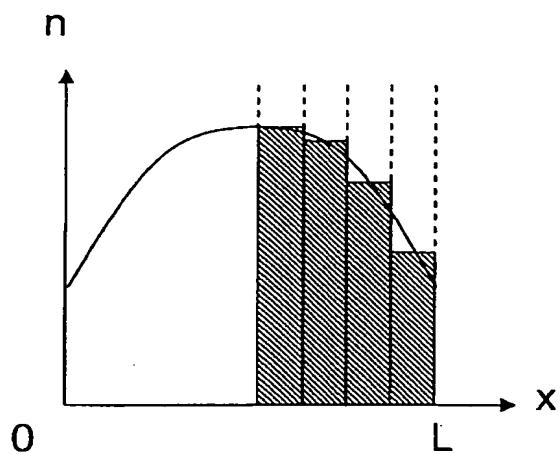
[図5]



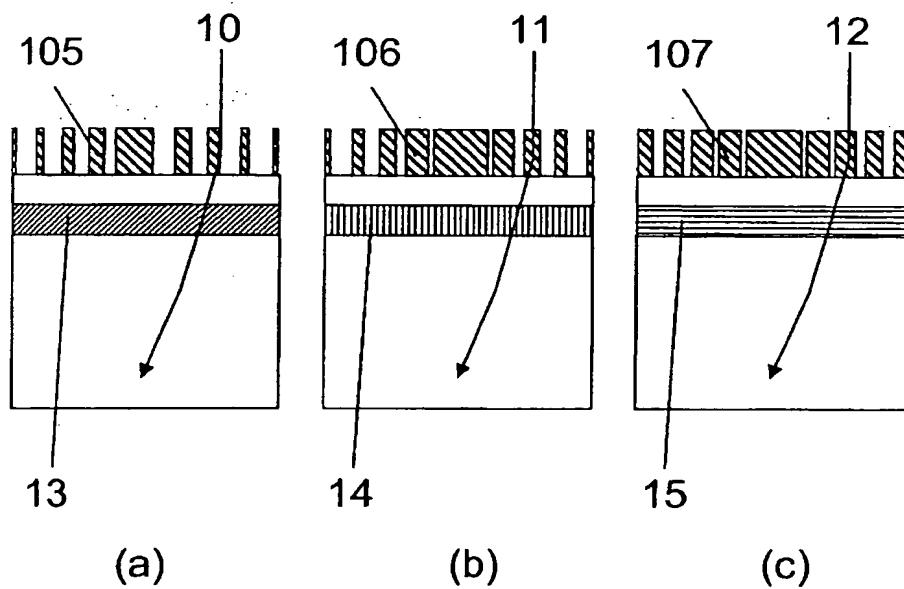
[図6]



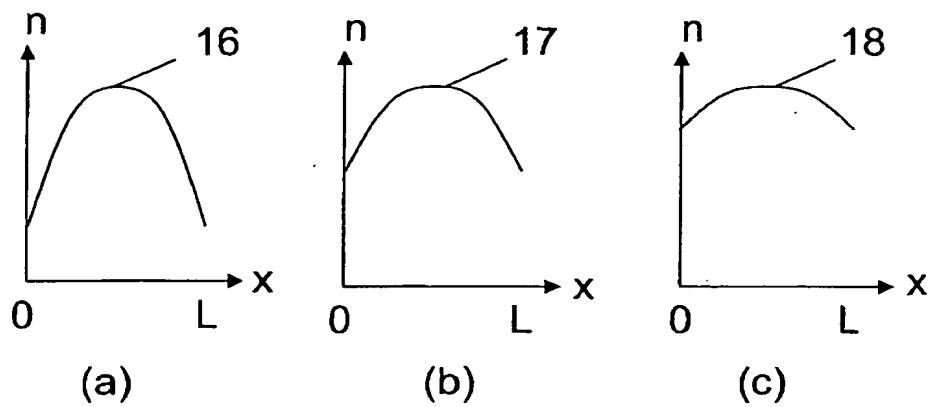
[図7]



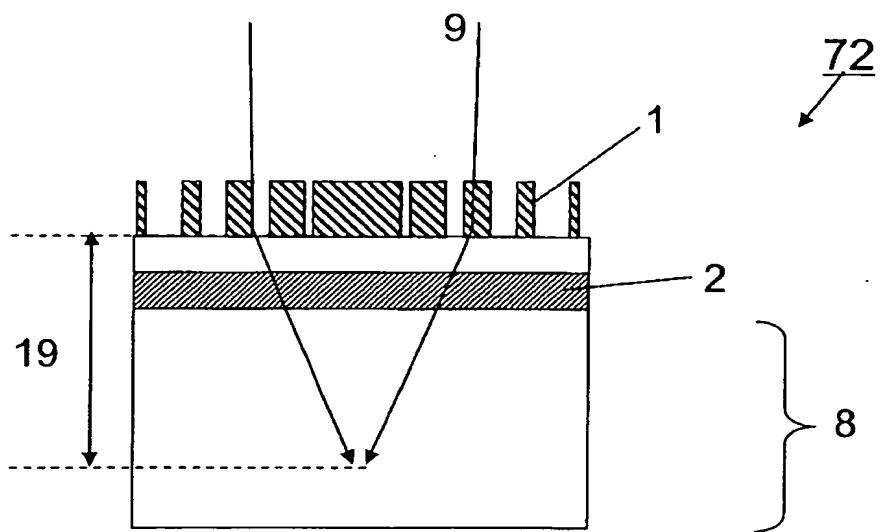
[図8]



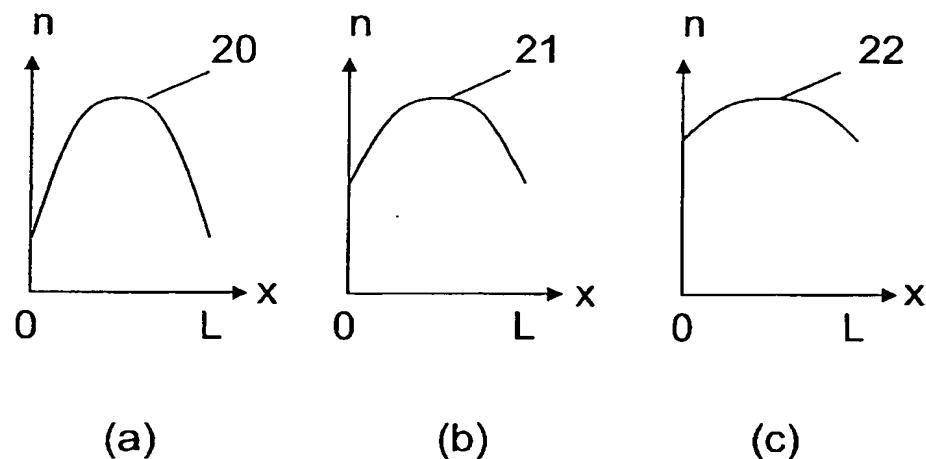
[図9]



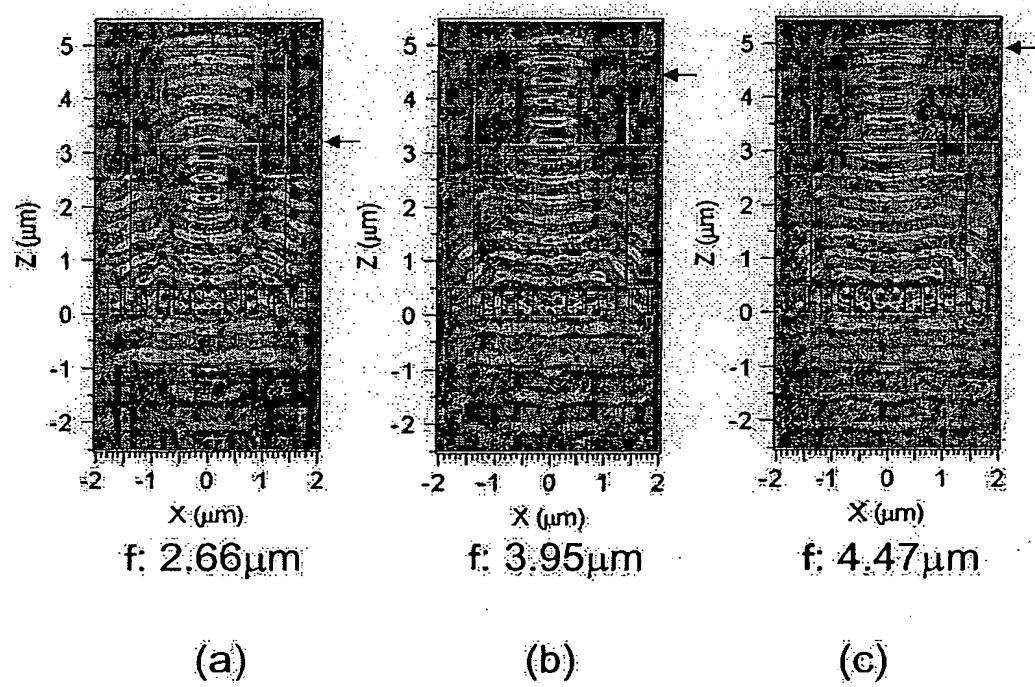
[図10]



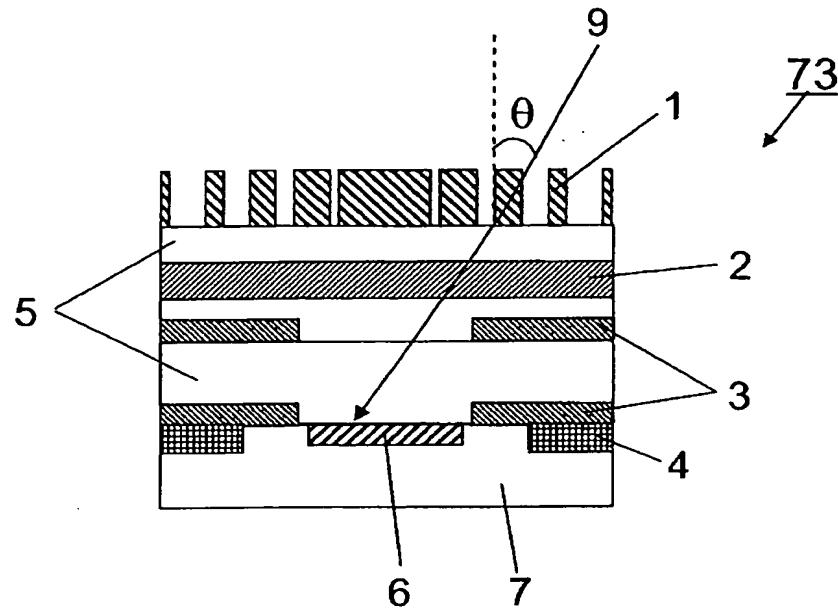
[図11]



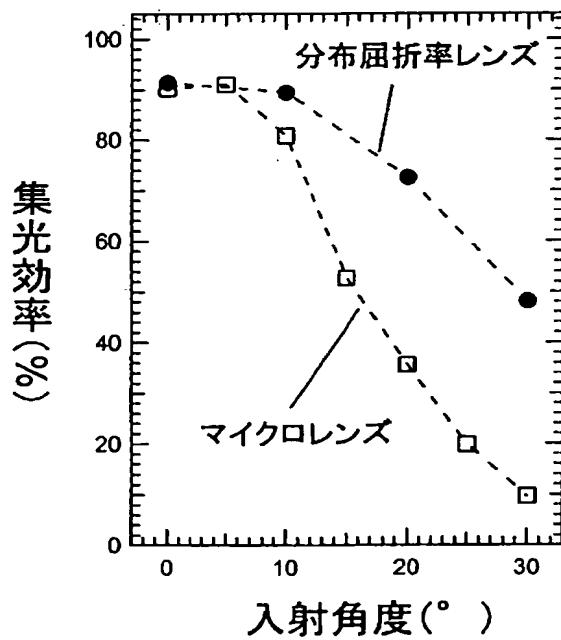
[図12]



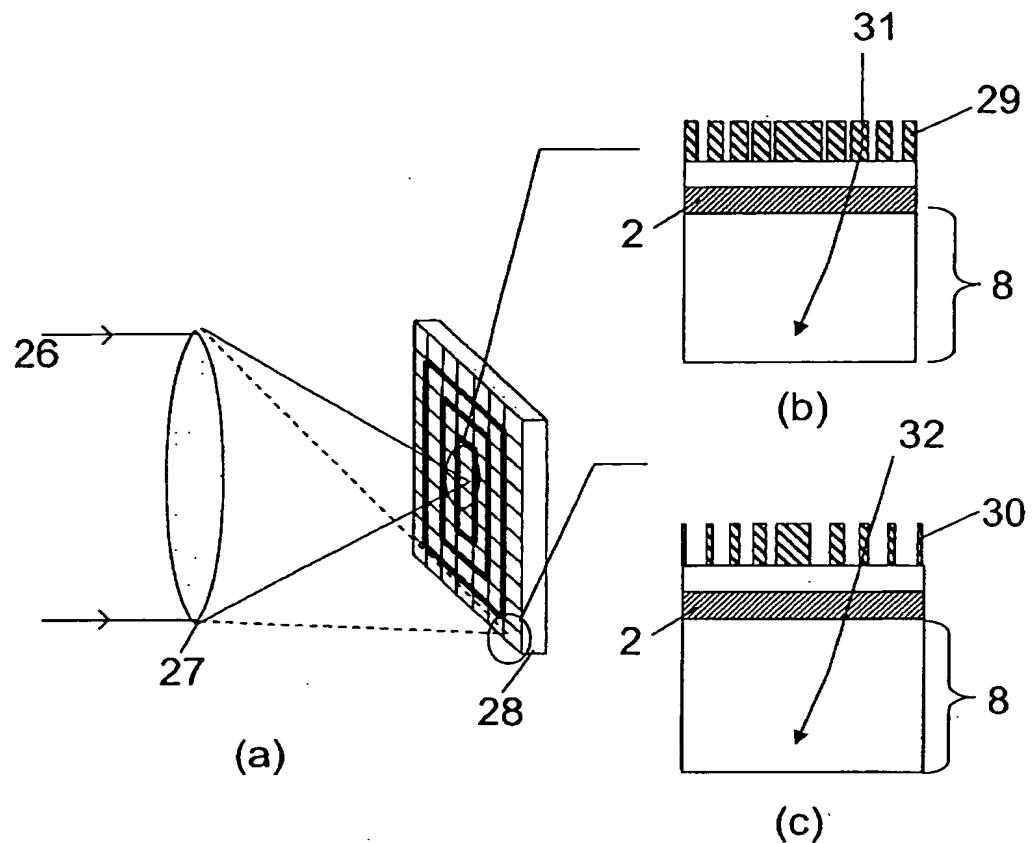
[図13]



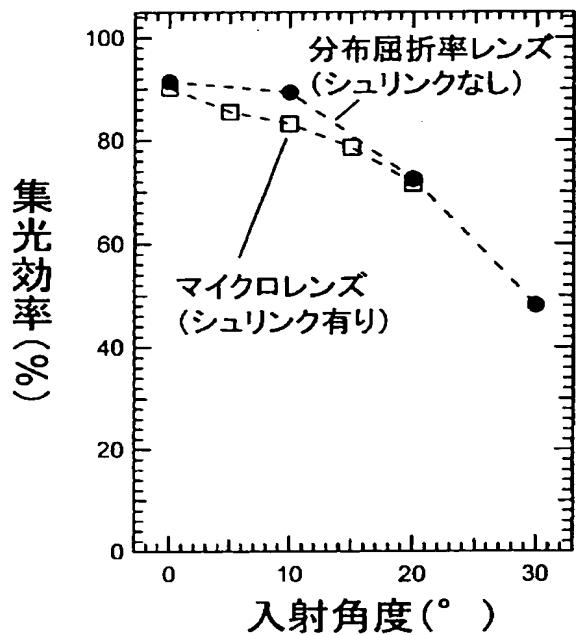
[図14]



[図15]



[図16]



[図17]

